

基于离散元法的棉花勺式排种器排种性能模拟

王 珏¹,杨 欣^{1*},王建合²,蔡雅琨³,钱 稷¹,何建华¹,张 亮¹,汪 强¹

1. 河北农业大学机电工程学院, 河北 保定 071001

2. 河北省农机化技术推广服务总站, 河北 石家庄 050011

3. 河北农业大学理工学院, 河北 沧州 061100

摘要: 为了研究棉花勺式排种器排种性能, 探讨影响排种器粒距合格率和重播、漏播率的因素, 建立了棉花勺式排种器的离散元仿真模型, 应用 EDEM 软件对棉花勺式排种器工作过程中棉籽的运动过程进行了仿真分析, 通过分析棉花勺式排种器排种过程, 明确了棉籽的运动规律和出现重播、漏播情况主要与充种、护种和递种的过程发生异常有关, 涉及的主要参数有勺匙曲面半径、勺匙角度、勺匙前斜面角度和排种盘转速等。在相同工况下, 进行台架验证试验, 结果表明, 仿真和台架试验结果基本一致, 说明采用离散元法分析棉花勺式排种器排种性能, 可以为进一步优化排种器提供依据。

关键词: 棉花勺式排种器; 离散元法; EDEM; 性能试验

中图分类号: S776.24+3

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2016)06-0873-06

Simulation for Performance to Seed Cotton with Scoop-type Based on Discrete Element Method

WANG Jue¹, YANG Xin^{1*}, WANG Jan-he², CAI Ya-kun³, QIAN Ji¹, HE Jian-hua¹, ZHANG liang¹, WANG qiang¹

1. College of Mechanical and Electrical Engineering/Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China

2. Hebei Agriculture Mechinzaition Station, Shijiazhuang 050011, China

3. College of Science and Technology/Agricultural University of Hebei, Cangzhou 061100, China

Abstract: In order to study the performance of seeding for the cotton scoop-type seed-metering device and the influencing factors of the qualified rate, the replay and the leakage sowing rate for grain distance of seed-metering device, the discrete element simulation model of cotton scoop-type seed-metering device was established. The movement process of cotton seed was analyzed by EDEM software when the scoop-type seed-metering device worked. By analyzing the process of seeding for the scoop-type seed-metering device, the movement process of cottonseed, the replay and the leakage sowing were related to the process of filling, protecting and transferring, and it referred to the factors of the surface radius, the angle, the front slope angle of spoon and the rotation speed disc. The bench test was carried out under the same conditions. It showed that the simulation results were in agreement with the experimental results and the performance of seeding for the scoop-type seed-metering device with the discrete element method can provide a reference for the further optimization of the seed-metering device.

Keywords: Cotton scoop-type seed-metering device; discrete element method; EDEM; experiment

勺式排种器属于机械式排种器的一种, 因其结构简单、工作可靠、维修方便等优点被广泛应用于棉花排种技术中^[1-4]。但勺式排种器很难满足高精度、高效率、性能稳定的播种要求, 因此如何分析改进棉花勺式精量排种器的技术性能成为一大难题^[5,6]。

英国 DEM-Solutions 公司开发的离散单元法模拟软件 EDEM, 可以辅助分析不规则粒子群的运动状态^[7-9], 管理每个粒子的信息(质量、温度、速度等), 并可计算作用于粒子上的力等。孙裕晶等采用 CAD 边界模型离散元设计分析方法, 验证离散元分析方法的可行性^[10]; 刘振宇将 CAD 软件与离散元分析软件进行集成, 通过计算结果与仿真结果对比, 证明分析系统的可用性^[11]。

为了分析研究棉花勺式排种器的技术性能, 采用离散单元法, 对排种器进行排种性能模拟试验, 以探明棉籽运动规律和造成重播、漏播的主要参数, 为进一步优化勺式排种器结构提供依据。

收稿日期: 2016-06-07

修回日期: 2016-09-13

基金项目: 河北省棉花产业创新团队建设棉花配套农机具研发与农机农艺结合岗专项(2013-2017 年度)

作者简介: 王 珏(1990-),男,河北邯郸人,硕士研究生. E-mail:649266760@qq.com

***通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:yangxin@hebau.edu.cn

1 棉花勺式排种器结构与工作原理

如图 1 所示, 棉花勺式排种器主要由排种器轴、左壳体、右壳体、排种勺轮、隔板、导种轮和清种门等部件组成, 工作区间可以分为五个部分, 即充种区、护种区、递种区、导种区和投种区。

棉花籽粒由进种管进入充种腔, 排种勺轮在外力的作用下绕排种器轴做圆周回转运动, 种腔充种区内的籽粒在排种勺轮的扰动下充入由排种勺轮与隔板形成的勺匙内并随排种勺轮回转进入将近 180°的递种区, 在导种轮回转中线的水平面投种, 完成一次播种周期, 实现播种。

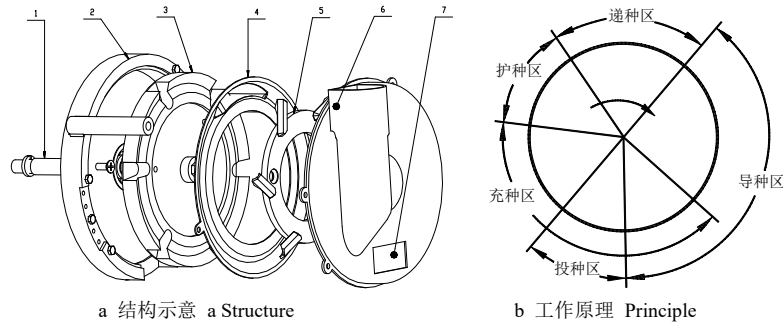


图 1 棉花勺式排种器结构示意图及工作原理

Fig.1 Structure and principle seeding cotton device with scoop-type

1. 排种器轴; 2. 左壳体; 3. 导种轮; 4. 隔板; 5. 排种勺轮; 6. 右壳体; 7. 清种门

1. Axis; 2. Left case; 3. Guiding wheel; 4. Clapboard; 5. Metering spoon wheel; 6. Right case; 7. Seed-cleaning door

2 接触模型的选择

离散元法模拟的是运动在颗粒集合中传播的过程, 颗粒运动必然会引起颗粒之间的相互碰撞, 颗粒之间必然有力产生^[12]。离散元中, 根据接触方式的不同, 可分为硬颗粒接触和软颗粒接触。对于软颗粒接触模拟, 允许两颗粒接触点间出现重叠部分, 可以依据颗粒间法向重叠量和切向位移, 计算接触力。法向力和切向力与颗粒间内摩擦力密切相关, 故将棉籽间的接触视为软颗粒接触^[13-15], 考虑到脱绒棉籽表面并无黏附力, 所以采用 Hertz-Mindlin 无滑移接触模型进行模拟。

如图 2 所示, 软球模型把颗粒间接触过程简化为弹簧振子的阻尼振动, 其运动方程为:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = 0 \tag{1}$$

式中, x 是偏离平衡位置的位移; m 是振子质量; c 和 k 分别为弹簧阻尼系数和弹性系数。

从式 (1) 可以看出, 颗粒所受恢复力和位移大小成正比, 所受黏滞阻力与速度大小成正比, 方向相反, 因此弹簧振子能量逐渐衰减。随着阻尼的增大, 弹簧振子分别呈现欠阻尼振动、临界阻尼振动和过阻尼振动。

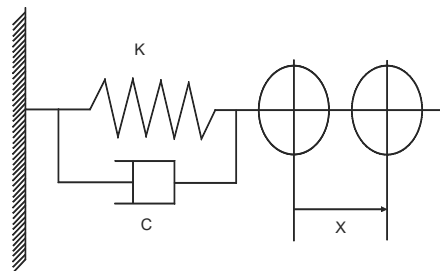


图 2 弹簧阻尼振子系统

Fig.2 Spring damping vibration subsystem

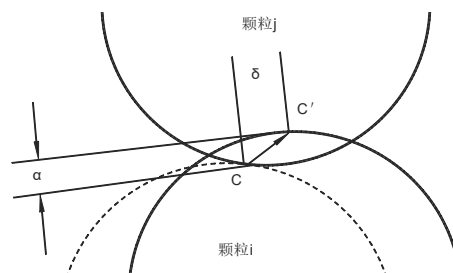


图 3 两相互接触的软球模型

Fig.3 Two soft-sphere model be in touch with each other

如图 3 所示, 颗粒 i 在惯性或外力作用下在点 C 与颗粒 j 接触, 虚线表示开始接触时颗粒 i 的位置。随着两颗粒相对运动, 颗粒表面逐渐变形并产生接触力, 软球模型不考虑该变形细节, 仅计算法向重叠量 α 和切向位移 δ , 进而得到接触力。

软球模型在颗粒 i 和颗粒 j 间设定了弹簧、阻尼器、滑动器和耦合器等。耦合器用来确定发生接触的颗粒配对关系, 不引入任何力。在切向, 如果切向力超过屈服值, 两颗粒在法向力和摩擦力作用下滑动, 由滑动阻力器实现这一目的。软球模型需要引入弹性系数 k 和阻尼系数 c 等参数来量化

弹簧、阻尼器、滑动器的作用，如图 4 所示。

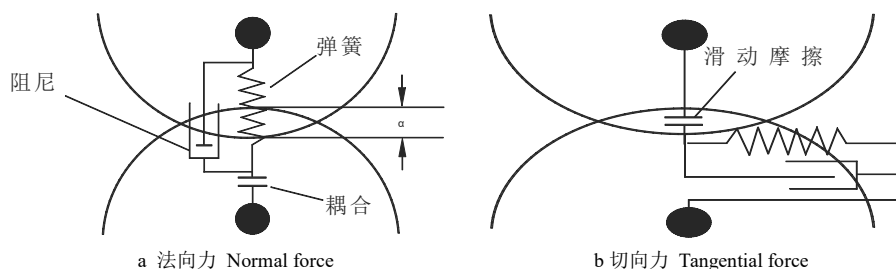


图 4 软球模型对颗粒间接触力的简化模型

Fig.4 Simplified model of particles contact force from soft-sphere model

3 虚拟仿真模型建立及仿真

棉籽模型的建立是虚拟仿真的基础，只有当棉籽模型与棉籽实物尺寸极其相似时，虚拟仿真的结果才具有说服力^[16]。脱绒棉棉籽的外形接近椭球体，但棉籽两端差异很大，其中一端呈锥形，另一端呈半圆球状，而且脱绒棉棉籽籽皮有部分凹陷和凸起。根据棉籽的粒型特点将棉籽的粒型基本界定在圆锥形和椭圆形之间。

本文选取新陆早 32 号棉籽进行研究，由于目前国内尚未建立关于棉籽尺寸标准，随机挑选 100 粒棉籽，测量棉籽外形尺寸，统计数据平均值，模型最终取长度为 8.5 mm，宽度为 4.5 mm。

利用离散元软件 EDEM 的 Creator 前处理模块生成棉籽颗粒体模型如图 5 所示。

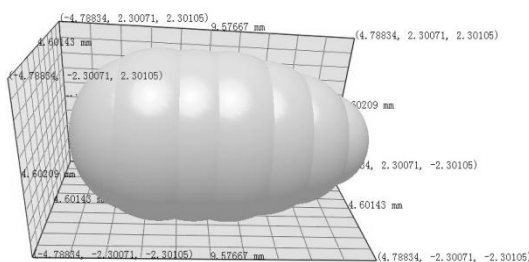


图 5 EDEM 中模型

Fig.5 Model in EDEM

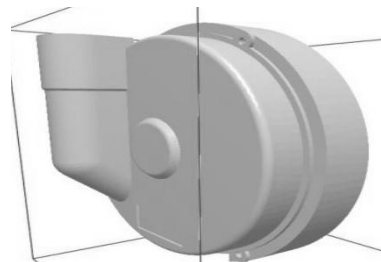


图 6 棉花勺式精量排种器仿真模型

Fig.6 Simulation model precisely sowing cotton with scoop-type

为便于仿真模拟及计算，将与棉籽运动过程中接触无关的部件去除，应用三维制图 AIP 软件对排种器进行实体建模，以.stp 格式导入 EDEM 软件中，如图 6 所示。按照排种器加工所用的材料，每个部件都被赋予了相应材质特性，棉籽、壳体的力学性能和相互之间的物理特性如表 1 所示。

为了保证棉籽可将整个排种器充满，且保证较好的充种条件，经过测试，最终将棉籽颗粒数量定位为 2500 粒，设置 EDEM 颗粒工厂以 5000 个/s 的速率生成初速度为 0 的棉籽模型，生成棉籽总时间为 0.5 s；设定仿真时间为 30 s，时间步长为 1×10^{-6} s；为了较清楚观察棉籽的运动过程，设置排种器模型以 Mesh 形式显示。

表 1 排种器结构参数

Table 1 Structural parameters of different seed-metering devices

项目 Item	属性 Attribute	值 Value
棉籽 Cotton seed	泊松比 Poisson's ratio	0.25
	剪切模量 Shear modulus/GPs	1.0×10^6
	密度 Density ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	640
壳体 Shell	泊松比 Poisson ratio	0.28
	剪切模量 Shear modulus/GPs	8.2×10^{10}
	密度 Density ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7890
籽粒-籽粒 Cottonseed-cottonseed	弹性恢复系数 Coefficient of restitution	0.3
	静摩擦系数 Coefficient of static friction	0.56
	滚动摩擦系数 Coefficient of rolling friction	0.15
籽粒-壳体 Cottonseed-shell	弹性恢复系数 Coefficient of restitution	0.52
	静摩擦系数 Coefficient of static friction	0.5
	滚动摩擦系数 Coefficient of rolling friction	0.1

4 仿真过程分析及结果

4.1 棉籽运动过程仿真

仿真计算过程中,可以将每个籽粒的运动以 Stream 形式显示,用不同的颜色表示不同的运动速度,可以清晰地显示每个籽粒的运动轨迹。在虚拟仿真中选取具有代表性的 3 个籽粒运动轨迹和 2 个速度时间关系曲线,如图 7 所示。

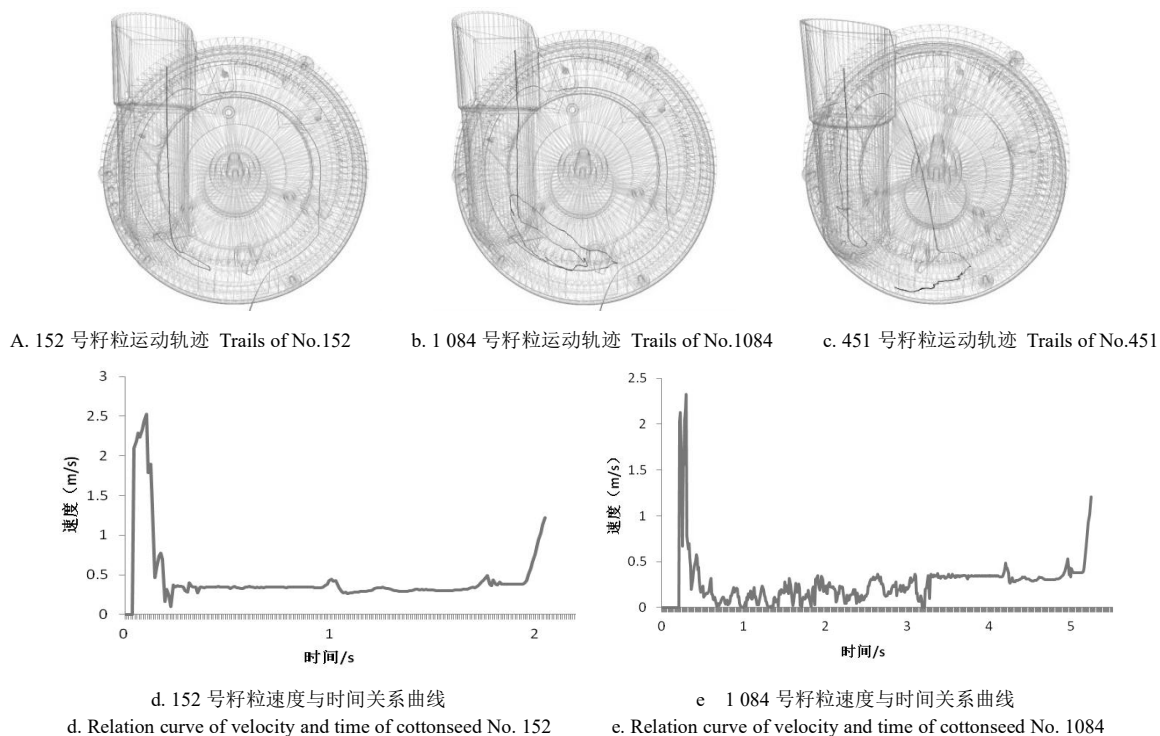


图 7 排种器工作时棉籽运动仿真

Fig.7 Dynamic simulation during cottonseed working

其中 7 a 为第一个排出籽粒轨迹,编号为 152 号,7 b 为 5.23 s 排出籽粒轨迹,编号为 1084 号,7 c 为 10.34 s 被舀取籽粒轨迹,编号为 451 号,7 d 为编号为 152 号的棉花籽速度与时间的关系曲线,7 e 为编号为 1084 号的棉花籽速度与时间的关系曲线。

由图 7 a 可以看出,当棉籽充入排种器时,该粒棉籽被排种勺轮和隔板形成的勺匙舀住,并随勺匙运动,当将要到达顶部时(此时的隔板有一条缝隙)籽粒所受到的隔板支撑力消失,平衡被打破,落入导种轮,随导种轮运动到底端排出;由图 7 b 可以看出,该籽粒在多次往复运动后被舀起,随后同 152 号运动轨迹相同;图 7 c 则可看出,被舀起种子在将要送入导种轮时掉落,导致漏播。由此可见通过分析单个籽粒运动轨迹可以统计被勺匙舀取范围和找出造成漏播主要位置。由图 7 d 可以看出,编号为 152 号的棉籽于 0.03 s 左右生成,从进种管落入排种器,在自身重力作用下速度不断增加,于 0.1 s 左右达到最高,此刻棉籽到达排种器底端,此后在与排种器壁和其它籽粒相互碰撞下减速;0.36 s 左右被勺匙舀起,并随排种勺轮勺匙匀速运动;1 s 左右棉籽从排种勺轮落入导种轮,随后同导种轮匀速运动,由于逐渐向边缘滑移,速度有所波动;1.75 s 左右导种轮型孔开始向下倾斜,棉花籽粒滑入型孔底端;2 s 左右导种轮型孔运动到排种器底端,棉籽排出,并在自身重力作用下开始加速。由图 7 e 可以看出,该棉籽 0~0.2 s 和 3.2~5.2 s 与 152 号棉籽 0~0.2 s 和 0.2~2.2 s 速度随时间变化趋势基本一致,0.2~3.2 s 该籽粒在排种器中做往复运动。

4.2 重播、漏播形成过程分析

在仿真过程中,排种器作业时除了单粒播种以外还存在重播和漏播 2 种状态。利用 EDEM 软件的 Analyst 功能,进行观察分析。图 8 为仿真中籽粒状态。

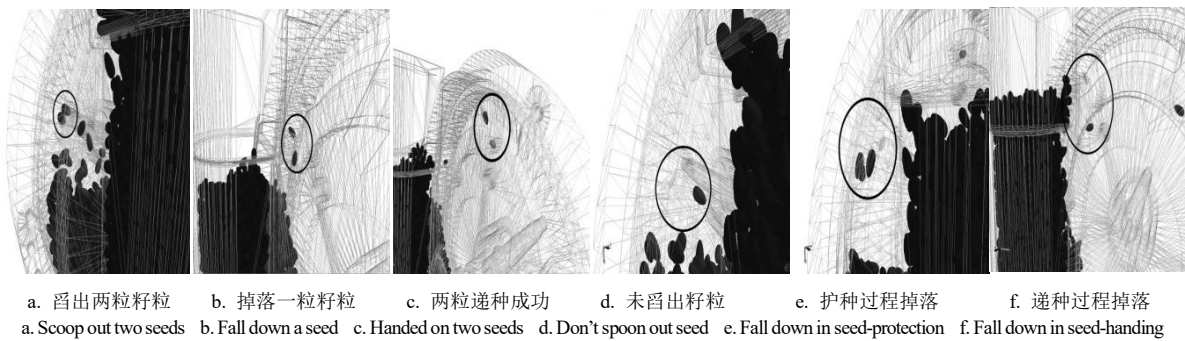


图 8 EDEM 仿真中籽粒状态

Fig.8 States in EDEM simulation

图 8 a 为排种勺轮勺匙刚运动出籽粒群,此时勺匙内携带 2 粒籽粒,图 8 b 为携带 2 粒籽粒的排种勺轮勺匙在运往递种区过程中掉落 1 粒,图 8 c 为携带 2 粒籽粒的排种勺轮勺匙运动到递种区并且 2 粒籽粒都成功递种,产生重播。由图 8 a 可以看出,产生重播的必要条件是充种时勺匙舀出 2 粒或多粒籽粒,根据籽粒可以保持平衡条件和观察得出护种过程当籽粒在勺匙内和在勺匙前倾面上时可达平衡,得到重播影响参数有勺匙曲面半径和勺匙前斜面角度;根据图 8 b 与 8 c 比较得出,在护种过程籽粒可能掉落(大多为籽粒未在勺匙内),这是由于在运动过程中勺匙角度发生变化打破平衡,故可得出影响重播、漏播的另一个参数为勺匙角度。

图 8 d 为排种勺轮勺匙刚运动出籽粒群,此时勺匙内未携带籽粒造成漏播;图 8 e 为排种器勺轮勺匙从籽粒群中舀到 2 粒种子但在运往递种口过程中脱落;图 8 f 为排种勺轮勺匙在将种子递入导种轮时脱落。通过以上观察分析得出造成漏播主要参数有:勺匙曲面半径、勺匙角度、排种盘转速等。

在多组虚拟试验中,发现所有重播、漏播现象均是在充种、护种和递种过程中产生的。

4.3 仿真结果

仿真结束后,利用 EDEM 后处理工作模块进行分析,在模型正下方建立 Grid Bin Group,以检测排出籽粒数。导出 Grid Bin Group 中的数据,绘制成折线图分析重播、漏播,如图 9 所示。

从图中可以看出籽粒数随时间增多且大致均匀。图 9 a 中 7 s, 9.5 s, 28 s 和图 8 b 中 12.5 s 左右, y 轴籽粒数发生上跃现象,表明在此时播下籽粒大于 1 粒,为重播;图 9 b 中 9 s, 14 s, 18.5 s, 22 s 和 24 s 左右, y 轴籽粒数持平,表明在此时未播下籽粒,为漏播。

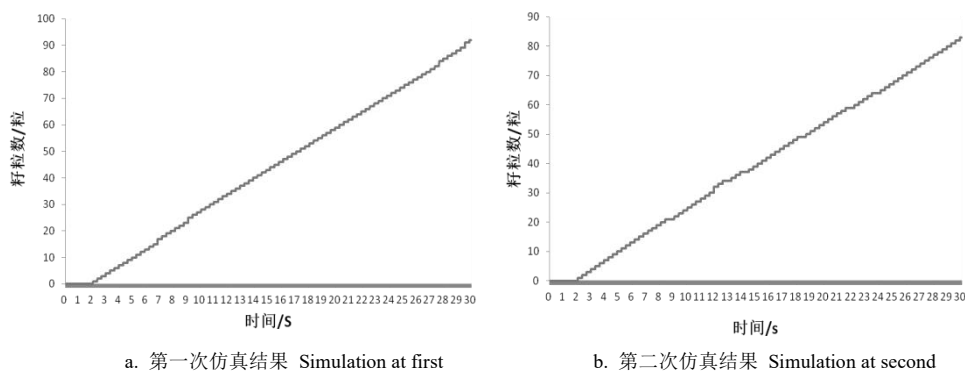


图 9 籽粒数与时间的关系曲线

Fig.9 Relationship between grain numbers and time

5 排种器台架试验验证

为验证虚拟仿真分析结果,进行排种器台架试验。试验地点为河北农业大学排种性能实验室,试验品种选用新陆早 32 号棉籽,试验仪器为黑龙江省农业机械研究院研制的 JPS-12 排种器性能检测试验台。试验过程中排种器固定在排种器安装架上,种床带相对于排种器反向运动,棉籽从排种器排出落至涂有油层的种床带上,通过试验台的图像采集处理装置和高速相机进行实时检测。如图 10 所示。



图 10 样机试验过程

Fig.10 Experiment process of prototype

台架试验结果表明,台架试验与仿真结果基本相同。在相同工况(30 r/min)下,台架试验结果与仿真的重播、漏播率最大误差为 8.1%。产生误差的原因可能是由于仿真虚拟试验中棉籽模型尺寸完全一致,而台架试验中棉籽虽为精挑细选,但形状尺寸仍有一定差异,并且台架试验过程中排种器运转存在振动,但误差均在可接受范围之内。

6 结论

(1) 以棉花勺式排种器为研究对象,采用 AIP 软件建立了排种器的三维模型,并在 EDEM 软件中进行了虚拟仿真。明确了棉籽的运动规律和出现重播、漏播情况主要与充种、护种和递种的过程发生异常有关,涉及的主要参数有勺匙曲面半径、勺匙角度、勺匙前斜面角度和排种盘转速等。

(2) 在相同工况(30 r/min)下选取新陆早 32 号棉籽进行台架验证试验。结果表明台架试验与仿真结果基本相同,台架试验结果与仿真重播、漏播率最大误差为 8.1%。表明采用离散元法分析勺式排种器排种性能可以为进一步优化排种器提供依据。

(3) 在准确引入机械 3D 模型和构建物料颗粒体模型并赋予准确相关属性基础上,应用 EDEM 对排种过程进行仿真,能直观模拟其工作过程,并获得速度、运动轨迹和仿真结果等定性定量数据,有利于机理研究,并能缩短设计周期,为产品优化提供参考,在农业物料研究领域有广阔的应用空间。

参考文献

- [1] 李宝筏.农业机械学[M].北京:中国农业出版社,2008
- [2] 张晓冬,李成华,李建桥,等.铲式玉米精密播种机振动特性模型建立与试验[J].农业机械学报,2014,45(2):88-93
- [3] 曹成茂,秦宽,王安民,等.水稻直播机气吹辅助勺轮式排种器设计与试验[J].农业机械学报,2015,46(1):66-72
- [4] 颜丙新.2BMM-3 免耕粉碎灭茬精量棉花播种机设计及仿形播种机构研究[D].淄博:山东理工大学,2014
- [5] 王金武,唐汉,王奇,等.基于 EDEM 软件的指夹式精量排种器排种性能数值模拟与试验[J].农业工程学报,2015(21):43-50
- [6] 王业成.摩擦式精密排种器的设计与试验研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2012
- [7] 王国强,郝万军,王继新.离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M].西安:西北工业大学出版社,2010
- [8] 胡国明.颗粒系统的离散元素法分析仿真[M].武汉:武汉理工大学出版社,2010
- [9] Cleary PW, Sawley ML. DEM modeling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge[J]. Applied Mathematical Modeling, 2002,26(2):89-111
- [10] 孙裕晶,马成林,牛序堂,等.基于离散元的大豆精密播种过程分析与动态模拟[J].农业机械学报,2006,37(11):45-48
- [11] 刘振宇.基于离散元法的精密排种器分析设计软件开发研究[D].长春:吉林大学,2004
- [12] 廖庆喜,张朋玲,廖宜涛,等.基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J].农业机械学报,2014,45(2):109-114
- [13] 胡建平,郭坤,周春健,等.磁吸滚筒式排种器种箱振动供种仿真与试验[J].农业机械学报,2014,45(8):61-65
- [14] Yoshiyuki S, Cundall PA. Three dimensional DEM simulation of bulk handling by screw conveyors[J].Journal of Engineering Mechanics, 2001,127(9):864-872
- [15] 王成军,刘琼,马履中,等.棉籽颗粒在三自由度混联振动筛面上的运动规律[J].农业工程学报,2015(6):49-56
- [16] 陈玉龙.基于有序充种方式的滚筒鸭嘴穴播器的设计研究[D].乌鲁木齐:石河子大学,2015